Die kosmische Symphonie Dunkle Materie, Neutrinos und Kosmologie

- 1. Mikrowellen vom Urknall
- 2. Dunkle Materie
- 3. Gekoppelte "Neutrino-Pendel"

Michael Kobel
Physik am Samstag
TU Dresden
18.11.2005

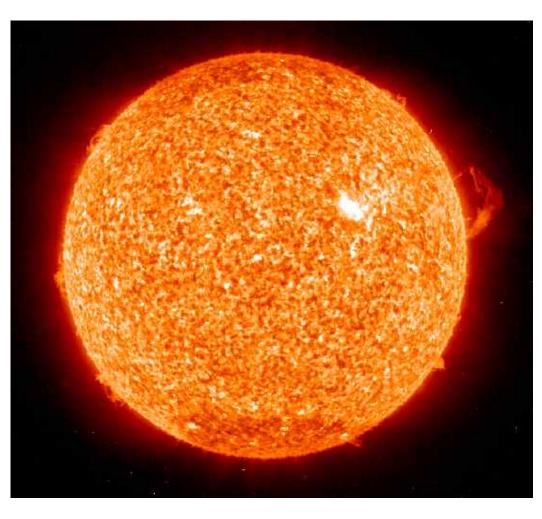
Rückblick zum Urknall

- 1 ms bis 1s nach dem Urknall
 - Antimaterie vernichtet ca. 99,999999% der Materie
 - Riesige Strahlungsmenge entsteht ("Photonen")



Analogie: Sonne

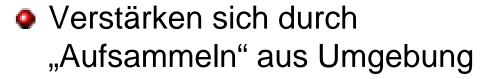
Gasball aus H₂ und He, normalerweise durchsichtig

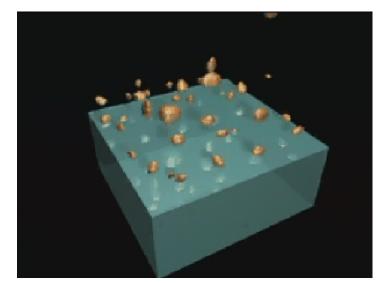


- Innen: T > 10.000.000 K
 - Ionisation der Atome
 - freie Elektronen
 - Licht jeder Energie wird absorbiert und wieder emittiert
 - Erst nach ~100.000 Jahren Ankunft nahe der Oberfläche
- Oberfläche (Photosphäre)
 - \bullet T = 6000 K
 - Elektronen an Atome gebunden
 - Licht kann entweichen
 - erreicht nach 8 min ungehindert die Erde

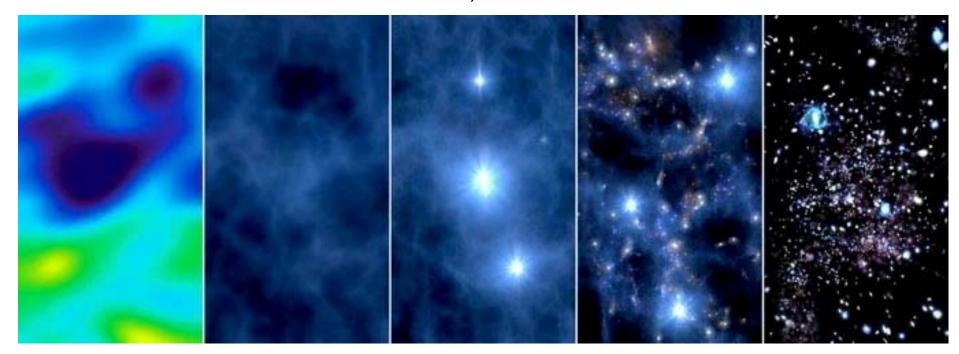
Strukturbildung im Universum

 Kleine Dichteunterschiede als Nachhall des Urknalls



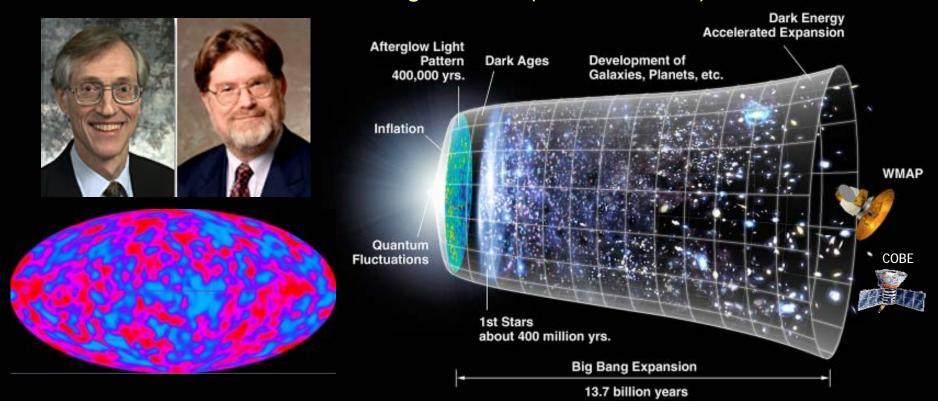


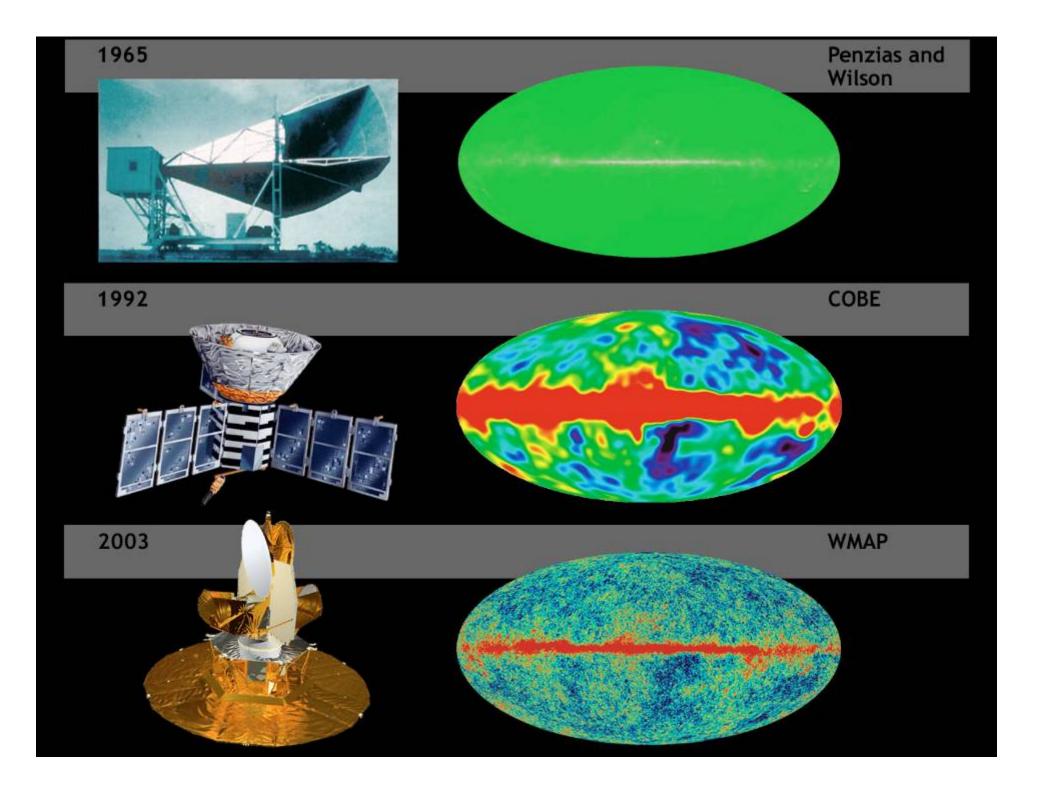
Schwerkraft: Wo schon viel ist, landet noch mehr



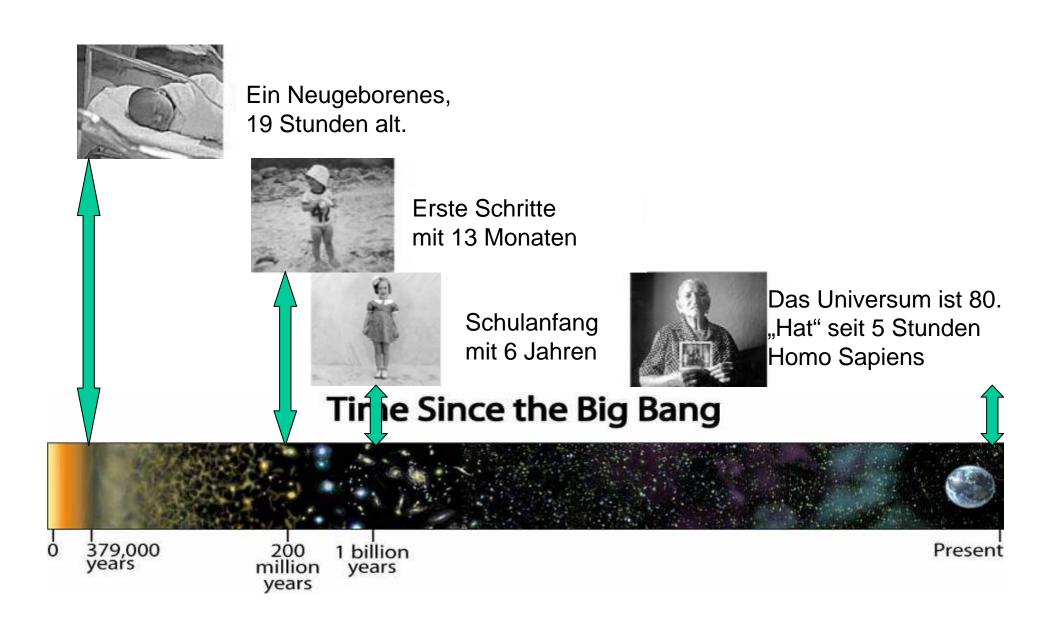
Der Nachhall des Urknalls

- Dichtere Regionen sind etwas wärmer als dünnere
- Hintergrundstrahlung von dort ist etwas energiereicher
 - Mittlere Temperatur heute: 2,73 K über absolut Null (-270,42 °C)
 - Typische Temperaturschwankungen: +- 0,0002 K
- Physik Nobelpreis 2006: Entdeckung dieser Schwankungen
 - John C. Mather und George Smoot (COBE Satellit)

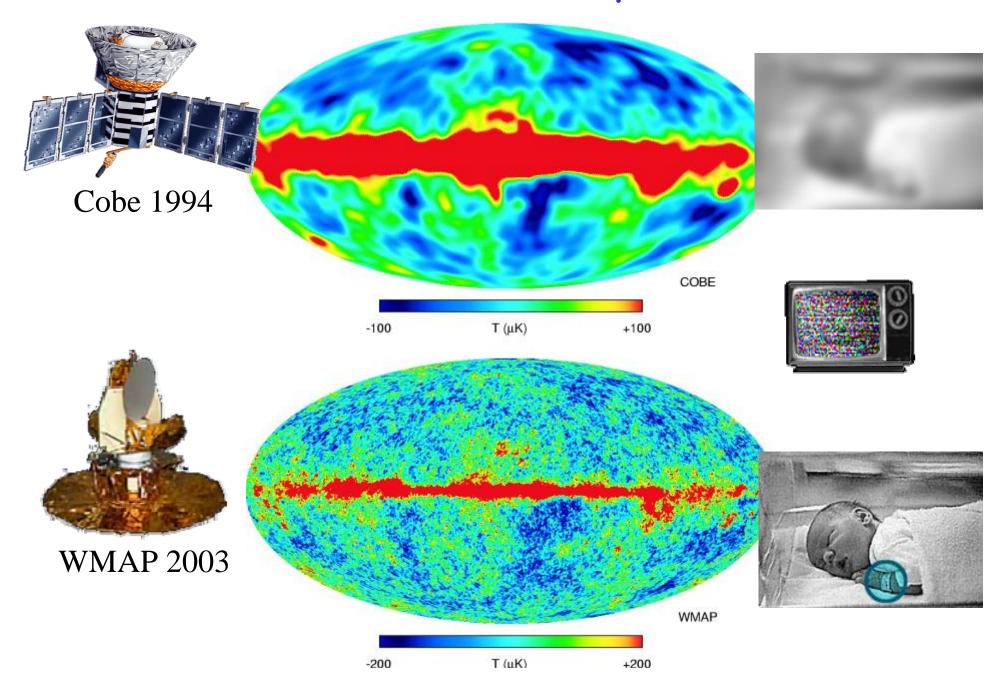




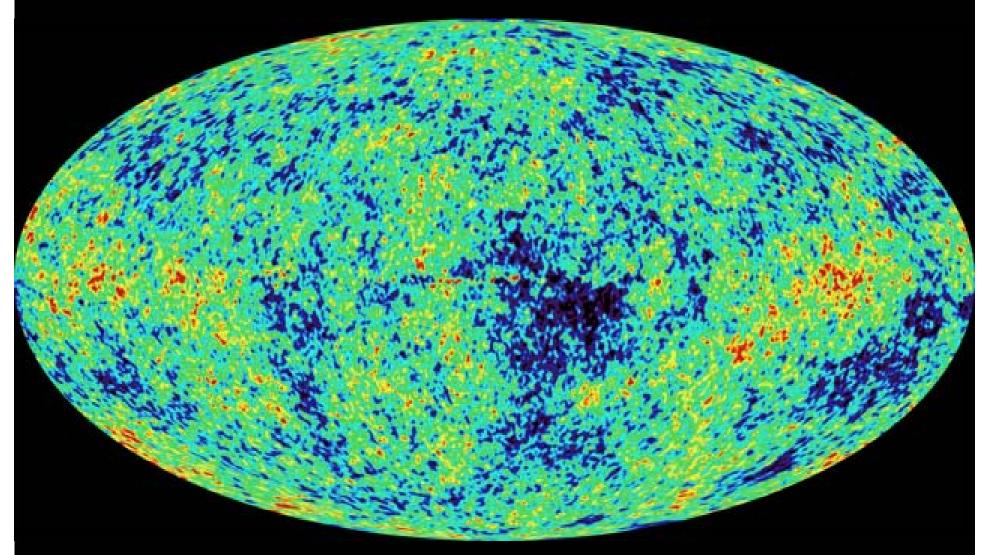
Wenn das Universum heute 80 Jahre wäre... (13.700.000.000 Jahre → 80 Jahre)



Mikrowellen als Babyfoto



Nach Abzug unserer Milchstraße

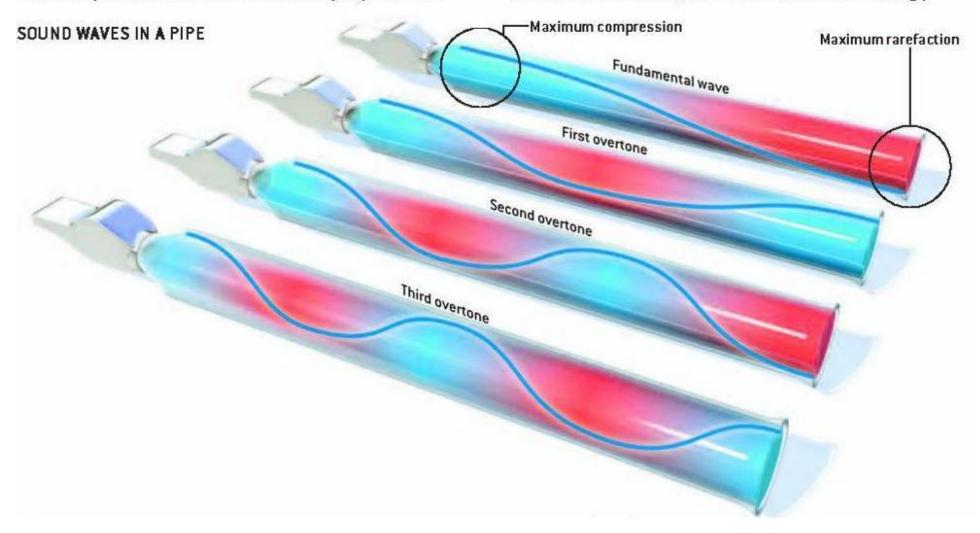


- Winzige Temperaturschwankungen: T=2,73 K +- 0,0002 K
- "heiße" und "kalte" Flecken = "dichte" und "dünne" Gebiete
- genau wie bei Schall → Klang des Universums

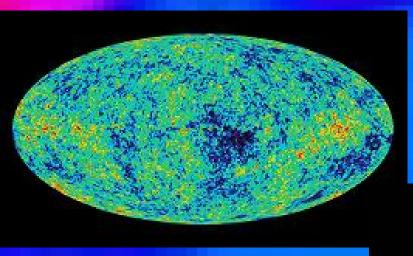
COSMIC HARMONICS

THE SOUND SPECTRUM of the early universe had overtones much like a musical instrument's. If you blow into a pipe, the sound corresponds to a wave with maximum air compression (blue) at the mouthpiece and maximum rarefaction (red) at the end

piece. But the sound also has a series of overtones with shorter wavelengths that are integer fractions of the fundamental wavelength. (The wavelengths of the first, second and third overtones are one half, one third and one fourth as long.)



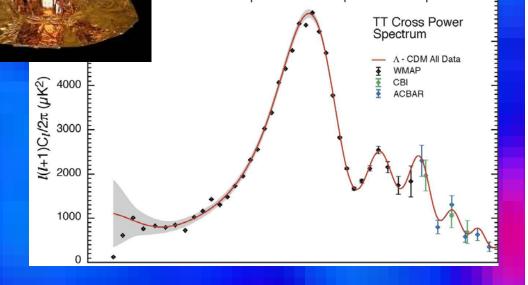
Die Obertöne des Kosmischen Klangs



- Das Ohr hört an Obertönen:
 - Art des Instruments
 - geübtes Ohr: Bauweise

Astrophysiker erkennen an den Obertönen:

- •"Form" des Universums
- Zusammensetzung



Angular Scale

Schallwellen vermessen Geometrie

$$\lambda$$
(Geometrie) = $\frac{v (1/\text{Dichte})}{f (\text{Tonh\"{o}he})}$

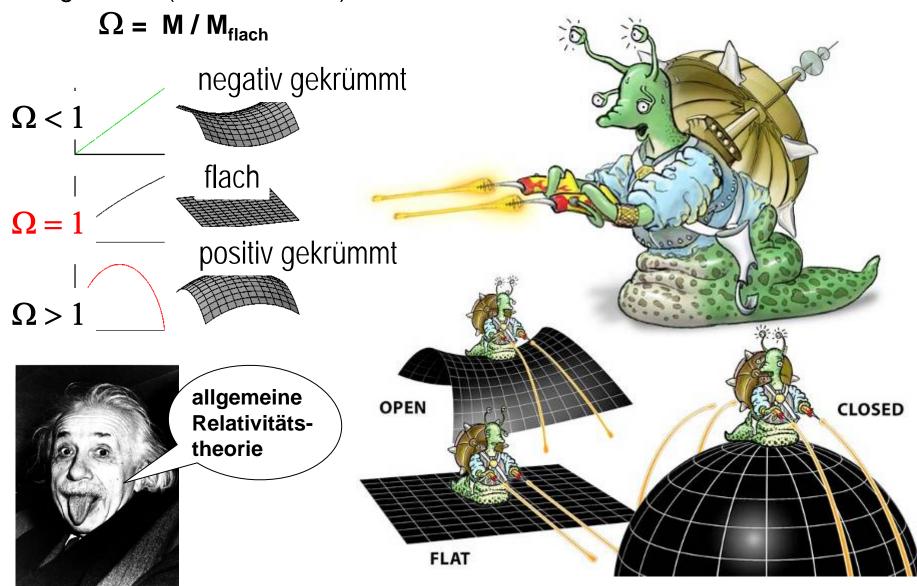
- Geometrieänderung (Dichte=const.) ergibt Frequenzänderung
 - Länge → Tonhöhe
 - Form → Klang (Frequenzzusammensetzung)
- Dichteänderung (Geometrie=const.) ergibt ebenfalls Frequenzänderung



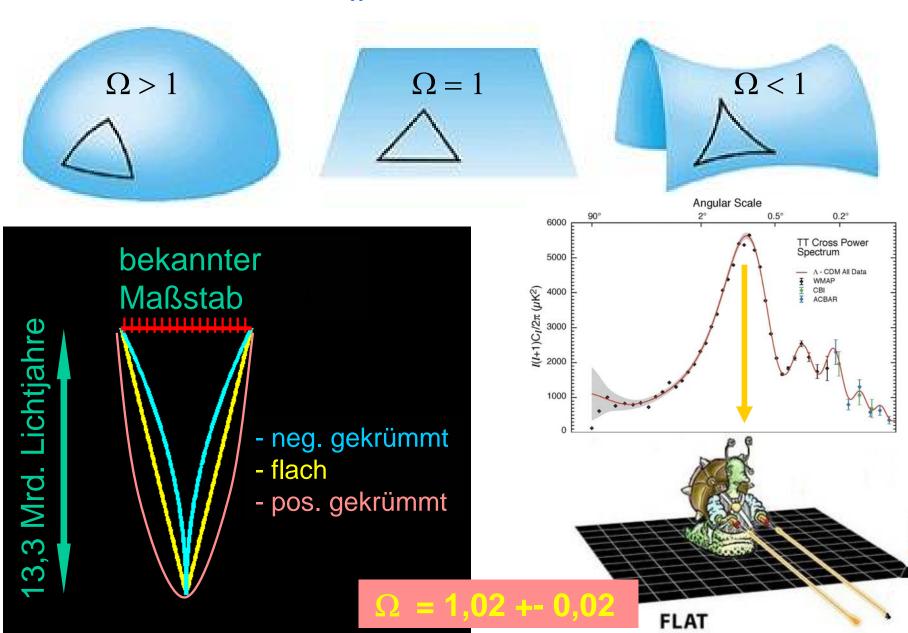
Universum: Kenne v und $f \rightarrow$ bestimme λ (Maßstab)

Raumkrümmung

erlaubt Rückschluss auf gesamten Energieinhalt (Masseninhalt) Ω



Geometrie = "Form" des Universums



Zusammensetzung des Universums

- Beiträge zur Gesamtenergie Ω
 - \odot atomare Materie (p,n,e): Ω_{B}

Sterne, Planeten, Gaswolken, Schwarze Löcher,...

- -- dämpft den ersten "Oberton"
- -- verstärkt den zweiten "Oberton"
- nichtatomare "dunkle" Materie (ν, ...): Ω_{DM}
 Ungebundene Elementarteilchen, schwach wechselwirkend

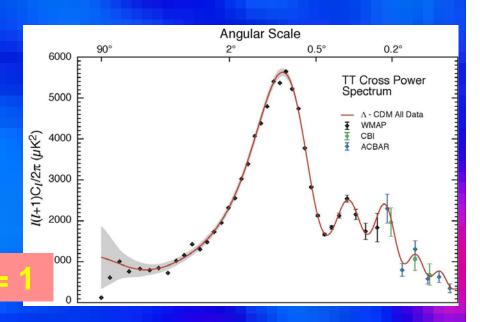
-- verstärkten den zweiten "Oberton"

• "dunkle" Energie: Ω_V

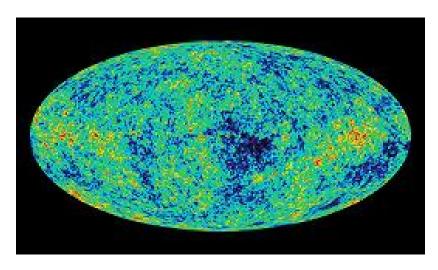
"kosmologische Konstante"

"Vakuumenergie" unverdünnbar

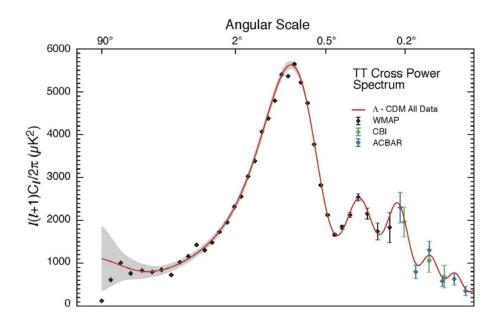
meine größte Eselei !?

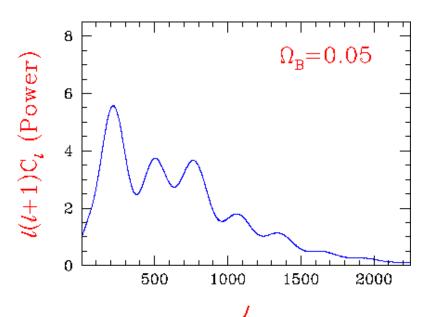


Ergebnis



- 5% atomare Materie ($\Omega_{\rm B} = 0.05$)
- 25% nichtatom. Materie ($\Omega_{DM} = 0.25$)
- 70% "dunkle Energie" $(\Omega_V = 0.70)$
- insgesamt flach (Ω =1,02+-0,02)

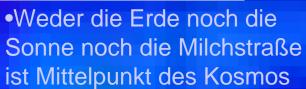




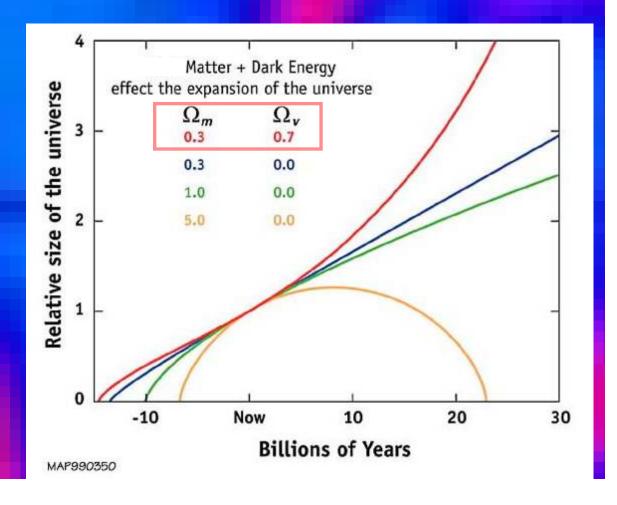


Zwischenbilanz

- Nur 30% des Universums ist Materie $\Omega_m = \Omega_B + \Omega_{DM} = 0.3$
- 5/6 davon ist nichtatomare, "dunkle", Materie möglicherweise uns völlig unbekannt
- 70% ist keine Materie, sondern "dunkle Energie" und treibt das Universum auseinander



- •Selbst der Stoff aus dem all das gemacht ist, ist eine Randerscheinung (< 5%)
- Die "dunkle Energie" bestimmt die Zukunft

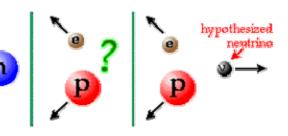


Sind Neutrinos die "Dunkle Materie"?



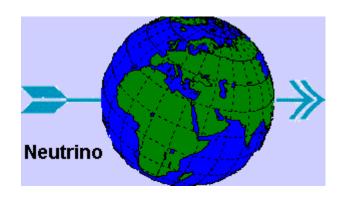
1930: theoretische Einführung (Pauli)

1956: experimentelle Entdeckung (Cowan und Reines)



Neutrinos: "Singles" des Universums

- schwach wechselwirkend:999.999.999 von 1.000.000.000schaffen Erddurchquerung
- ziemlich verbreitet:
 366.000.000 Neutrinos / m³
 im Vergleich zu 0,2 Protonen / m³



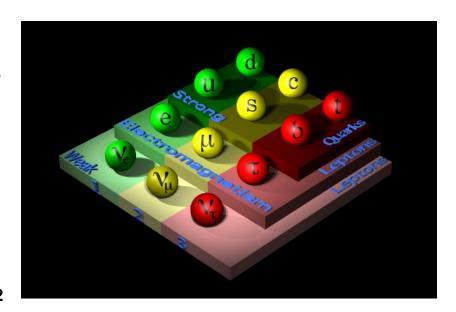
aber (bis vor kurzem): Ruhemasse unbekannt

Pendel als Waage für Neutrinos

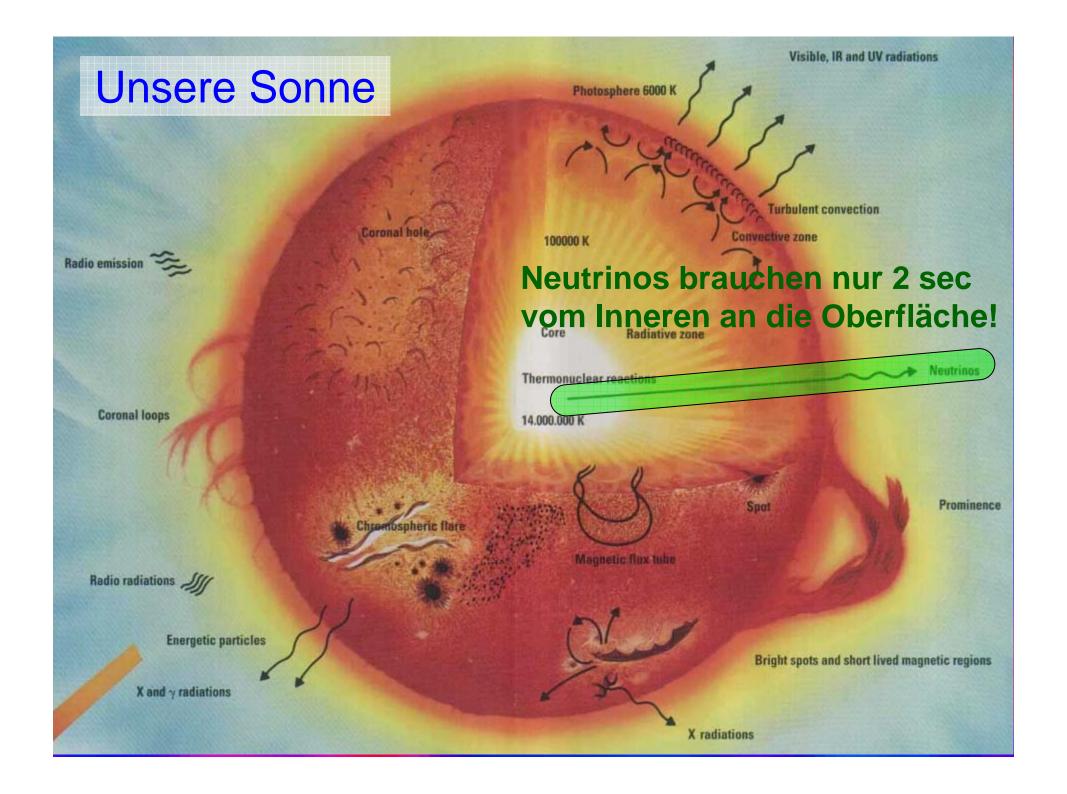
Quantenphysik:

Es gibt 3 Sorten von Neutrinos: $v_e v_\mu v_\tau$ ("Pendel") gekoppelt zu 3 stabilen Moden $v_1 v_2 v_3$

- kleiner Energieunterschied ΔE²,
 abhängig von Kopplung
 - Pendel: Frequenzunterschied Δf²
 - Neutrinos: Massenunterschied Δm²



- Anregung nur eines Pendels:
 - Regelmäßige Oszillationen der Pendel, abhängig von Kopplung
- Bei Herstellung nur einer Neutrinoart:
 - Regelmäßige Umwandlungen in die andere(n) Art(en)
- Bei Nachweis nur einer Neutrinoart:
 - Neutrinos scheinen zu "verschwinden", abhängig von Δm²
 - Analog zu akustischen Schwebungen bei kleinen ∆f²

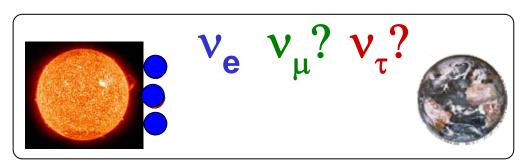


Neutrinos aus der Sonne

Kernfusion in der Sonne:

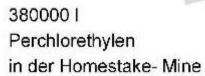
4p
$$\rightarrow$$
 ⁴He + 2e⁺ + 2v_e + 27 MeV Energie
auf der Erde: 10¹¹ solare Neutrinos / cm² und Sekunde

Produktion:100% als"v_e-Pendel"



• Davis (1970 -2000): v_e Nachweis auf der Erde Ergebnis: nur 30% der erwarteten v_e

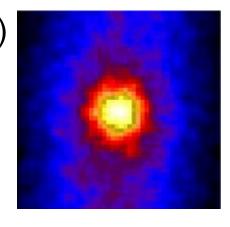




$$v_e$$
 + $^{37}CI \rightarrow ^{37}Ar$ + e^-

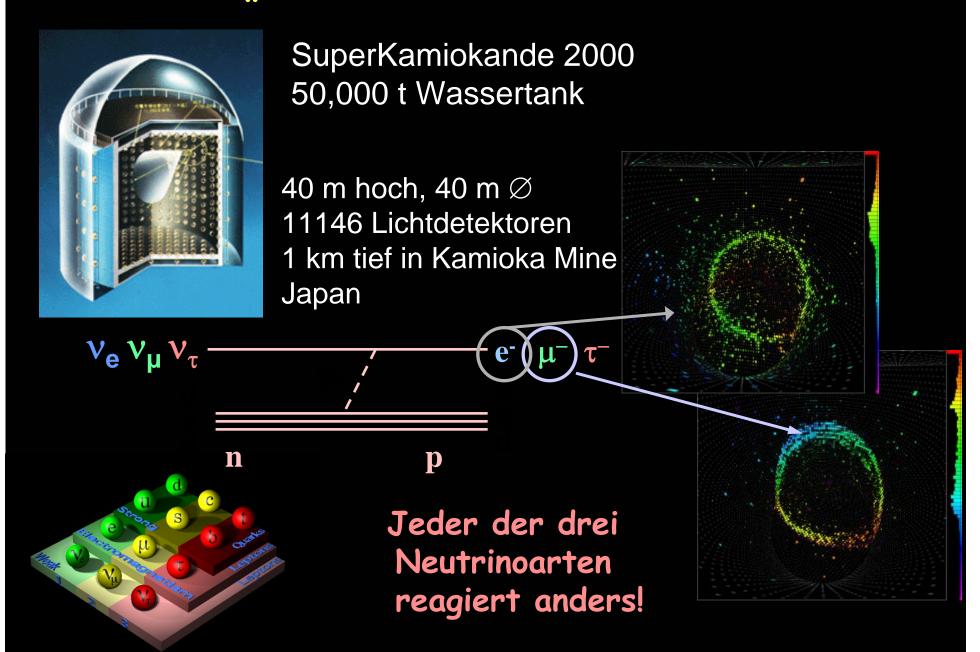


Bestätigung (1995) Kamiokande (Sonne live! im "Neutrinolicht")

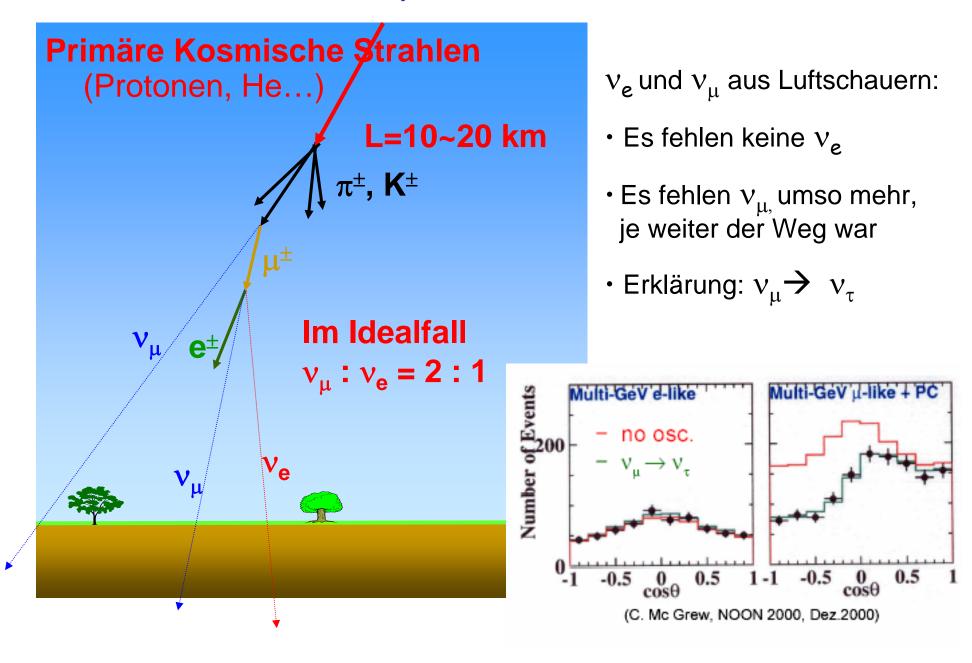


Ausspülen des ³⁷Ar (0.5 Atome/Tag)

Der "Überlichtknall" der Neutrinos



Atmosphärische Neutrinos

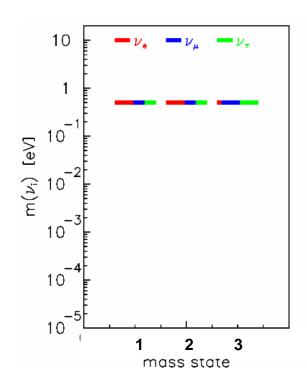


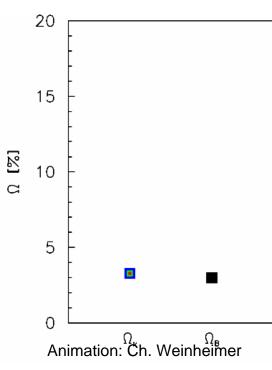
Erklärung der Messungen

- Sonnenneutrinos: weniger $\mathbf{v_e}$ wegen Oszillation $\mathbf{v_e} \rightarrow \mathbf{v_{\mu,\,\tau}}$ Atmosphärische Neutrinos: weniger $\mathbf{v_{\mu}}$ wegen Oszillation $\mathbf{v_{\mu}} \rightarrow \mathbf{v_{\tau}}$
- Nur möglich bei Energiedifferenz (d.h. Massendifferenz!)
 zwischen den stabilen Moden v₁ v₂ v₃
- →Neutrinos haben Masse!!

(Allerdings hier nur Differenzen von m² messbar!)

- Beitrag zur Masse des Universums: $0.1\% < \Omega_{v} < 4\%$
- erklärt nur kleinen Teil der "dunklen" Materie

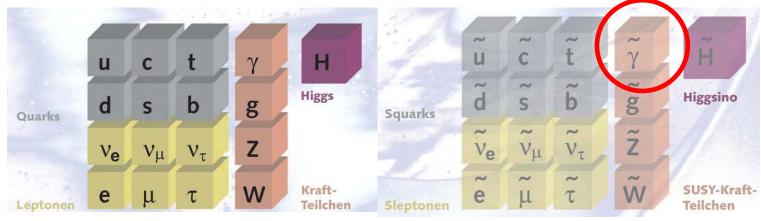




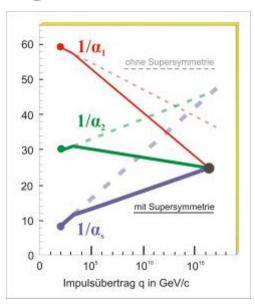
30000 years 0 0 10-4 Sec 10-10 Sec 10-32 sec 0

Andere Kandidaten für Dunkle Materie?

Supersymmetrische Teilchen?



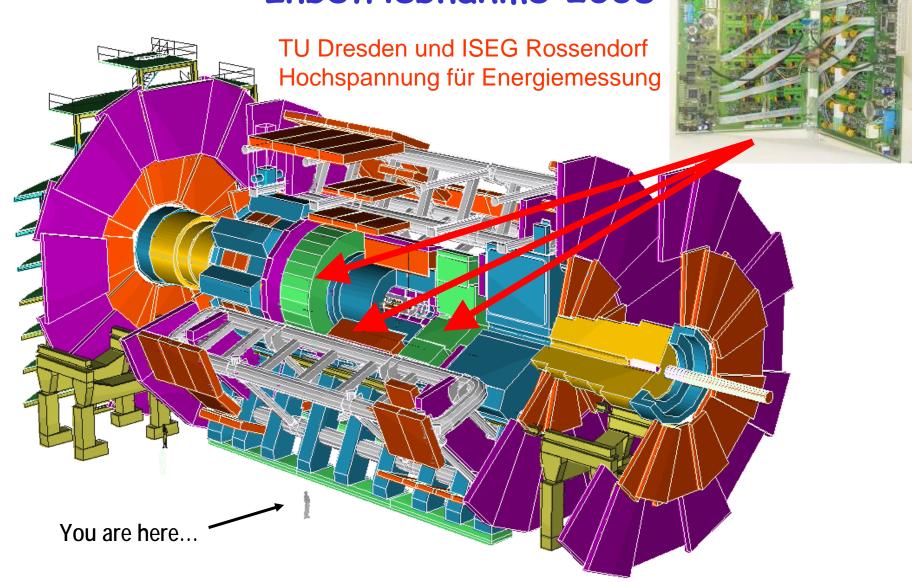
- Würden helfen, mehrere Theoretische Fragen zu lösen
 - Vereinigung aller Kräfte incl Gravitation
 - Verständnis großer Zahlenverhältnisse
- Leichtestes SUSY Teilchen stabil
 - = Dunkle Materie (ca 3000 /m³)?
 - stabil, massiv (> 50 Protonmassen), schwache Wechselwirkung
 - Direkte Entdeckung möglich bei: ATLAS & CMS am LHC des CERN



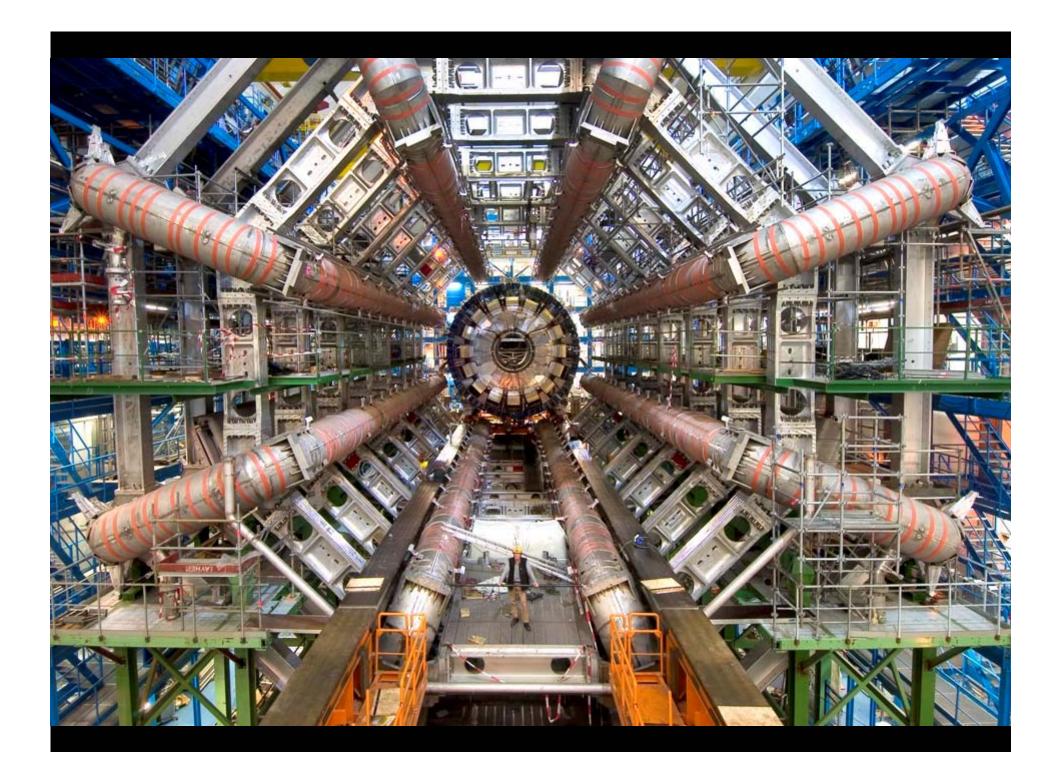
Der Large Hadron Collider LHC am CERN



ATLAS Experiment am CERN, Genf Inbetriebnahme 2008



Ingesamt 1800 Wissenschaftler aus 170 Instituten aus 35 Ländern



Zusammenfassung

- Die "Kosmische Symphonie" der Mikrowellenhintergrund Obertöne ergeben Form und Zusammensetzung des Universums
- Das Universum ist im Mittel flach
- Die Masse der uns bekannten atomaren Materie bildet weniger als 5% der Gesamtenergie des Universums
- Neutrinos erklären nur einen Bruchteil der 25% nichtatomaren "dunklen" Materie im Weltall
- Es gibt Ideen, was der Rest ist (→ ATLAS / LHC Experiment 2008)
- 70% der Gesamtenergie steckt in "dunkler Energie", unverstanden, aber bestimmend für Zukunft des Weltalls
- Kosmologie und Teilchenphysik, Quantenphysik und Mechanik sind eng verknüpft

